

10B21 含硼冷镦钢轧后结疤成因分析及工艺改进

肖广阔¹, 韩鹏龙², 孙晓林³, 高春群², 刘志国²

(1 邯鄲钢铁集团有限责任公司冷轧厂, 邯鄲 056015; 2 邯鄲钢铁集团有限责任公司一炼钢厂, 邯鄲 056015; 3 河北工程大学材料科学与工程学院, 邯鄲 056038)

摘要: 通过实验及热力学分析得出, 轧制 10B21 钢结疤形成主要原因为钢中平均 N 含量为 127×10^{-6} , 导致铸坯角部冷却过程中在奥氏体晶界析出细小的 BN 和 AlN 夹杂, 增加了铸坯的裂纹敏感性, 形成铸坯裂纹。通过提高铁水比 ≥ 920 kg/t、转炉终点 C-T-P (碳-温度-磷) 命中率 $\geq 85\%$ 、出钢口圆流出钢以及 LF 加热次数 ≤ 3 次, 时间 ≤ 25 min 等措施可将钢中的氮含量稳定控制在 $\leq 50 \times 10^{-6}$, 有效避免 10B21 钢轧后盘条结疤, 提高成材率, 降低成本。
关键词: 冷镦钢 10B21; 盘条; 轧后结疤; BN; AlN

Forming Reason and Process Improvement of Seab Defects Rolled Boron-bearing Cold Heading Steel 10B21

Xiao Guangkuo¹, Han Penglong², Sun Xiaolin³, Gao Chunqun², Liu Zhiguo²

(1 Cold rolling plant, Handan Iron and Steel Group Company Limited. Handan 056015;
2 Frist Steelmaking Plant, Handan Iron and Steel Group Company Limited. Handan 056015;
3 College of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038)

Abstract: Through experiments and thermodynamic analysis, it is obtained that the main cause of the scab forming of rolled 10B21 steel is the average nitrogen content in steel being 127×10^{-6} , lead to the precipitation of fine BN and AlN inclusions at the austenite grain boundary at the corner of cast billet during cooling, increasing the crack sensitivity of the billet and forming the billet crack, the nitrogen content in steel can be stably controlled below 50×10^{-6} by increasing the consumption of molten iron ≥ 920 kg/t, increasing the C-T-P (Carbon-Temperature-Phosphorus) hit rate $\geq 85\%$ at the end of the converter, discharging steel from the outlet round, heating number of times of LF ≤ 3 time, and ≤ 25 minutes casting. It can effectively prevent wire rod scarring of 10B21 steel after rolling to improve the yield of rolled steel and to reduce the production cost.
Material Index: Cold Heading Steel 10B21; Coil; Rolled Scarring; BN; AlN

10B21 钢是用于生产 8.8 级以上的紧固件的主要冷镦钢之一, 在钢中加入少量的 B 元素代替其他合金元素, 减少脱碳的敏感性, 增加钢中的铁素体含量, 降低变形抗力, 韧性和抗疲劳性能得到明显的改善, 并可提高淬透性能和冷加工性能, 从而达到既能提高冷镦性能又能降低成本的目的。但是含硼钢的裂纹敏感性较强, 硼含量的微小变化容易引起铸坯上的较大缺陷^[1-4]。

近期生产的一批 10B21 钢线材轧制后出现结疤现象, 如图 1 所示, 该缺陷在盘条表面沿纵向分布, 且有多处结疤致使废品率增加。为进一步提升产品质量, 本文对线材表面结疤成因进行分析。

1 生产工艺及成分要求

本研究所用含硼冷镦钢 10B21 的生产工艺流

程为: 120 t BOF \rightarrow LF \rightarrow 150 mm \times 150 mm CC, 化学成分见表 1。

2 结疤缺陷分析

结疤随机分布在线材表面, 每盘约有数十个, 10 ~ 30 mm 长不等。为分析 10B21 冷镦钢结疤产生的原因, 随机从结疤部位截取线材试样 5 个, 沿横截面切开, 对结疤位置的形貌、组织及夹杂物进行分析, 同时测量了多炉次 10B21 钢的气体含量。

2.1 金相分析

取结疤部位的横截面进行组织分析。1021B 钢基体组织主要为铁素体 + 珠光体, 珠光体分布在共析铁素体之间, 按照《GB/T6394-2017 金属平均晶粒度测定方法》基体晶粒度为 9 级, 满足国标对冷镦钢的晶粒要求。

表 1 10B21 钢化学成分/%
Table 1 Chemical composition of steel 10B21 /%

C	Si	Mn	P	S	Al	B	Ti	Cr	N
0.19 ~ 0.23	≤0.10	0.60 ~ 0.90	≤0.025	≤0.020	≥0.020	0.001 6 ~ 0.003 0	0.035 ~ 0.050	≤0.30	≤0.007 0



图 1 10B21 钢线材表面结疤形貌
Fig. 1 Morphology of scarred surface of 10B21 steel wire

对结疤位置进行金相观察,典型裂纹形貌如图 2(b) 所示,使用显微镜对缺陷位置横截面进行观察,可以清楚的看到结疤折叠位置向里有裂纹的延伸,微观检测裂纹缺陷较深,约为 340 μm 左右、宽度为 2 ~ 7 μm,主裂纹为不规则形状,与轧制方向成 30°角,在主裂纹旁产生无规律的二次裂纹,与主裂纹角度小于 45°。腐蚀后可以清楚看到裂纹脱碳,脱碳层深度 20 ~ 60 μm,脱碳组织主要为铁素体,在靠近边部区域铁素体粗大见图 2(a),试样裂纹应该产生于加热炉之前,在加热炉加热过程中裂纹处产生脱碳现象,因此,判定该裂纹应该产生于铸坯裂纹缺陷。同时在裂纹旁发现有夹杂物质点,为分析夹

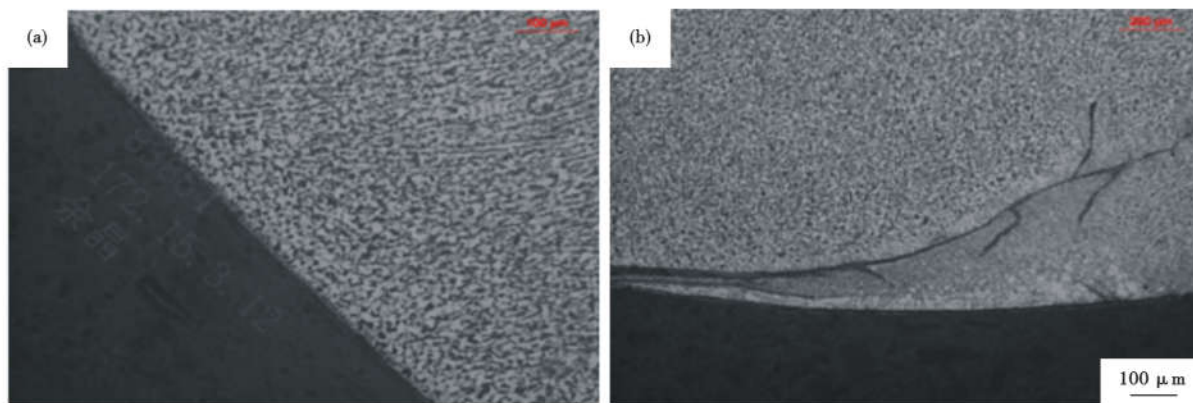
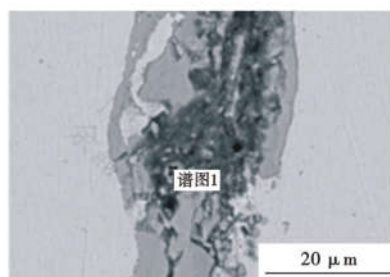


图 2 10B21 钢线材 (a) 正常边部和 (b) 结疤处横截面组织形貌
Fig. 2 Structure morphology of 10B21 steel wire at cross-section: (a) normal edge, (b) at scarring



元素	质量分数/%	原子分数/%
CK	26.04	42.71
OK	35.53	43.74
FeK	38.42	13.55
总量	100.00	100.00

图 3 10B21 钢线材结疤缺陷形貌和成分, SEM
Fig. 3 Morphology and composition of 10B21 steel wire scarring defect, SEM

2.2 电镜分析

对缺陷部位内部成分进行能谱分析,缺陷形貌及成分测试结果如图 3 所示,缺陷中主要元素为 Fe、O、C 等,以氧化铁为主,尺寸约 25 μm,结合金相和能谱分析该氧化物是在加热炉加热过程中发生脱碳、氧化反应生成的,形成氧化铁皮后在轧制过程中不断压缩变形。夹杂物中还有少量的镁铝尖晶石,但其尺寸较小,一般在 5 μm 以下,且考虑镁铝尖晶石为硬脆性夹杂物,在变形过程中变化不大,因此判定镁铝尖晶石夹杂物不是造成铸坯开裂的主要原因^[5-6]。

2.3 N 含量分析

在盘条钢中随机取样 20 个,进行 N 含量分析,得出该批次盘条中氮含量在 $(98 \sim 149) \times 10^{-6}$,平

杂物组成使用扫描电镜对其组成进行测试。

均约 127×10^{-6} 。而钢中 N 含量在钢中主要以两种形式存在,固溶于基体中起到固溶强化作用,此外可与 Ti、B、Al 等结合形成氮化物,当 N 含量较高时形成 BN 夹杂,会增加铸坯的裂纹敏感性^[7-9]。

由于生成的 BN 尺寸多为 100 nm ^[4],需使用透射电镜进行分析。但在该钢种内,能够形成氮化物的元素主要是 B、Ti、Al 三种,其在钢基体内的溶度积为:

$$\lg\{[Al] \cdot [N]\} = 1.79 - 7184/T \quad (1)$$

$$\lg\{[Ti] \cdot [N]\} = 0.32 - 8000/T \quad (2)$$

$$\lg\{[B] \cdot [N]\} = 4.16 - 14694/T \quad (3)$$

式中:T 是绝对温度/K;[Al],[Ti],[B]分别处于固溶态的质量分数/%;如果仅考虑某单个元素与 N 在钢内的固溶平衡,可以通过上述公式计算出平衡态下某一氮化物开始析出的温度,将 [Al] = 0.0030%, [Ti] = 0.0400%, [B] = 0.0020% 代入

计算可得到析出温度与 N 含量的关系曲线,如图 4 所示。

由图 4 可知:在 $N > 18 \times 10^{-6}$ 时,TiN 在钢水已变为固态夹杂物,而 BN 和 AlN 在钢水中均为液体存在;当钢中 N 按平均值取 127×10^{-6} 进行计算,可得到析出温度为 $T_{(AlN)} = 884 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{(TiN)} = 1940 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{(BN)} = 1405 \text{ }^\circ\text{C}$;在钢水中 TiN 已经形成固态,BN 在开始凝固至 $1405 \text{ }^\circ\text{C}$ 时开始析出,AlN 最后析出。

但钢中 N 含量偏高, $n(\text{Ti}) = 8.3 \text{ mol} < n(\text{N}) = 9.1 \text{ mol}$,且该反应为可逆反应,无法完全转化为 TiN,因此此时钢中的 Ti 含量不足于固定如此多的 N 含量,即钢中 N 含量是过剩的。因此,过剩的 N 与 B 和 Al 反应生成 BN 和 AlN(同浓度下 B 反应热力学条件最好),造成大量的 BN 和 AlN 夹杂物在冷却过程中从晶界析出,形成微裂纹。

取该炉次铸坯随机取铸坯样,采用热酸腐蚀去除表面氧化铁皮,检查表面质量,见图 5 所示。铸坯角部存在细小的角部裂纹,部分裂纹分布在振痕的谷底处,与含硼钢裂纹较为相似^[4]。

3 控 N 措施及效果

对 10B21 钢生产过程中的 N 含量进行控制的措施为:

(1) 冶炼该钢种时转炉执行高铁耗操作,铁水消耗由 850 kg/t 提高至 920 kg/t ,取消发热剂的加入,保证转炉吹炼过程中碳氧反应,促进铁水中的原始 N 含量去除。

(2) 提高转炉终点 C-T-P(碳-温度-磷)命中率至 85% 以上,减少后吹,避免钢水吸 N。

(3) 加强出钢口维护,确保钢流圆实。出钢过程底吹气量控制在吹开直径 $300 \sim 500 \text{ mm}$,合金顶渣全部熔化后可关小钢包底吹气。

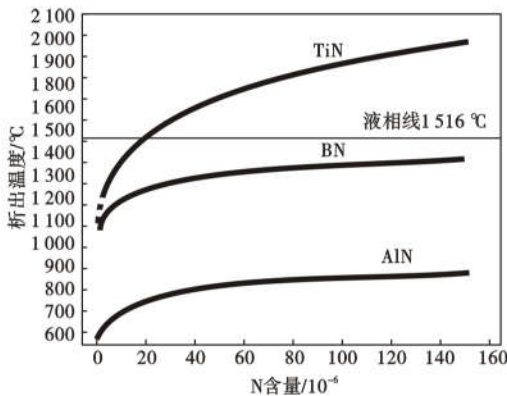


图 4 钢中 N 含量对 TiN, BN 和 AlN 析出温度的影响
Fig. 4 Effect of nitrogen content in steel on precipitation temperature of TiN, BN and AlN



图 5 含 $127 \times 10^{-6} \text{ N}$ 的 10B21 钢铸坯角部裂纹形貌
Fig. 5 Morphology of cast billet corner crack of 10B21 steel containing $127 \times 10^{-6} \text{ N}$

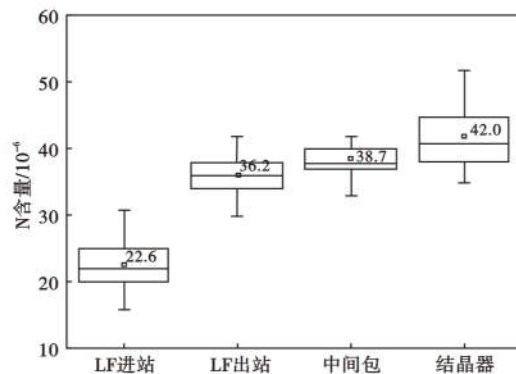


图 6 10B21 钢生产过程氮含量变化
Fig. 6 Changes of nitrogen content in production process of 10B21 steel

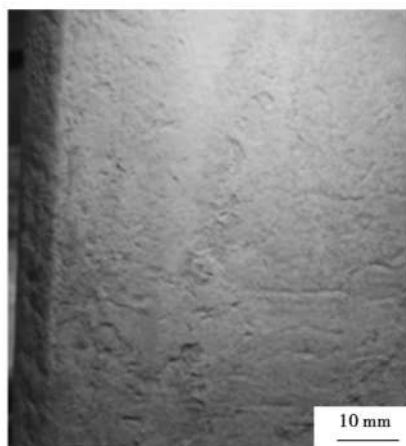


图 7 含 $42 \times 10^{-6} \text{N}$ 的 10B21 钢铸坯角部低倍形貌
Fig. 7 Corner morphology of macro cast slab of 10B21 steel containing $42 \times 10^{-6} \text{N}$

(4) 生产时减少非周转包投用, LF 加热次数 ≤ 3 次, 时间 $\leq 25 \text{ min}$ 。

(5) 连铸做好中间包及结晶器保护浇注, 整体包浸入式水口损坏后, 禁止外挂水口浇注, 防止吸 N。

通过以上措施的执行, 并在 LF 进站、LF 出站、中间包、结晶器进行取气体样, 连续整浇次抽查 3 个浇次, 钢水中 N 含量变化如图 6 所示, 铸坯低倍角部质量如图 7 所示。

参考文献

- [1] 田树生, 易耀云, 杨勇, 等. 含硼钢裂纹成因分析及改进[J]. 金属材料与冶金工程, 2010, 38(5): 36-38.
- [2] 包汉生, 傅万堂, 程世长, 等. T122 耐热钢中氮化硼(BN)化合物的探讨[J]. 钢铁, 2005, 40(10): 68-71.
- [3] 彭其春, 童志博, 陈立鹏. 中碳含硼钢氮含量控制[J]. 武汉科技大学学报, 2013, 36(2): 81-84.
- [4] 乔淞. 低成本高强度含硼冷镦钢盘条研发[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2017: 2-18.
- [5] 帅习元, 叶巍, 仇东丽, 等. 含硼冷镦钢 10B21 冷镦开裂原因分析[J]. 钢铁研究, 2014, 42(6): 40-42.
- [6] 张玉成, 罗新中, 朱祥睿, 等. 10B21 冷镦钢冷镦成型开裂原因分析[J]. 南方金属, 2018, 6, 222: 26-30.
- [7] 邓志银. 高强度螺栓钢夹杂物控制技术[D]. 沈阳: 东北大学, 2011: 18-30.
- [8] 刘国梁, 季晨曦, 倪有金, 等. 含硼钢板坯角部横裂产生原因及控制研究[J]. 钢铁钒铁, 2013, 8, 34(4): 94-98.
- [9] 孟杨, 史学星, 蔡宁, 等. 含硼铝镇静钢中 B 元素的脱溶现象和析出相特征[J]. 材料热处理学报, 2012, 9, 33(9): 80-84.

由图 6 可知, 改进后成品氮含量基本控制在 50×10^{-6} 以下, 平均约 42×10^{-6} , 其中 LF 精炼过程为主要的增 N 环节;

生产过程中对 1-8 流每流铸坯各取 1 个试样, 表面热酸蚀后检查, 振痕谷底处微细裂纹基本消除。采用相近加热和轧制工艺生产盘条约 4 000 t, 加大检测力度、批量检查盘条的表面质量, 均未见结疤缺陷。

4 结论

(1) 铸坯角部振痕下方的微小横裂纹是造成盘条表面结疤的主要原因。

(2) 铸坯角部振痕下方的微小横裂与钢中 N 含量异常有直接关系。在 10B21 钢成分范围内, TiN 在钢中以固态形式存在, 而 BN 和 AlN 在钢水中均以液态存在, 在 N 含量较高时, 铸坯凝固时产生较多 BN 和 AlN 等脆性夹杂在晶界析出时, 降低了钢的塑性, 是产生裂纹的直接原因。

(3) 通过提高铁水消耗至 920 kg/t 以上, 转炉终点 C-T-P 命中率至 85% 以上, 出钢口圆流出钢; LF 加热次数 ≤ 3 次, 时间 $\leq 25 \text{ min}$; 连铸禁止使用外挂水口等措施可稳定控制钢中的 N 含量 $\leq 50 \times 10^{-6}$, 能够有效预防 10B21 钢种轧后盘条结疤。